[发电机]

一起650 MW水轮发电机组单相接地故障诊断

文/国电科学技术研究院　宋功益　江建明　李砚海

某大型水电站安装4台担负调峰调频的650 MW水轮发电机组，4F机组带负荷运行时，基波零序电压及注入式低频电源原理的两套定子接地保护动作跳机。通过不同手段确定故障线棒接地位置，诊断得出故障原因为层间测温垫条工艺不良，并给出了处理及防范措施。

某大型水电站4F发电机型号为SF650－48/1450，额定容量722.2 MV·A，额定功率650 MW，Y型接线，48极，每相8分支，每分支24槽，共576槽，采用密闭自循环风冷冷却方式，中性点采用接地变接地方式。

故障前，该机组带554 MW有功负荷并网运行，2016年7月5日05:47:19，上位机报“4号机组发电机保护A套电气事故、4号机组发电机保护B套电气事故、4号机组1号保护定子接地跳闸、4号机组1号保护电气事故跳闸、4号机组2号保护定子接地跳闸、4号机组2号保护电气事故跳闸”。4号机组电气故障停机流程起动，机组出口断路器DL4、灭磁开关FCB跳闸，机组一级过速动作，最高转速为156 r/min（124.8%*Ne*），甩负荷后，全厂AGC、AVC退出。故障跳闸后，系统电压由527.78 kV上升至532.18 kV，系统频率由50.04 Hz下降至49.97 Hz。

故障位置查找

1．故障位置判定

根据保护装置动作情况及故障录波波形，结合现场三相拆引后定子绝缘测试情况，见表，初步判断定子绕组C相发生单相接地故障。

表　4F发电机绝缘测试数据　　单位（MΩ）

RA－GND	RB－GND	RC－GND
338	340	0

该机组每相有8个并联分支，为确定C相哪个分支接地，采用拆引后C相对地加交流小电流的方法确定第3分支存在接地。该分支共48根线棒，为缩小排查范围，采用该分支加直流电压两端测量对地电压和总电压的方法，确定疑似接地线棒范围为第212槽上层线棒的周边线棒。为精确查找故障线棒，采用该分支两端加直流电压，在疑似故障线棒绝缘盒电钻打孔测量电压正反向的方法，确定单相接地故障线棒为C相第3分支的第198槽下层线棒靠近下端部位置。拆除该机组上层部分盖板，吊出一个磁极，为拔出198槽下层线棒，将该槽及左侧10根以及右侧14根（188～212槽，共计25根，其中引线6根）上层线棒拆除。

利用刨刀、扁铲等对绝缘盒及大面积灌注胶进行拆除，利用电阻焊机对并头块进行加温，将并头块烫开，对疑似故障线棒单独进行绝缘电阻测量，最后确认该198槽下层线棒确为故障线棒，经解剖，故障线棒击穿部位如图1所示。

图1　198#下层线棒绝缘击穿部位

2．接地线棒检查

检查发现198#槽上层线棒槽部直线部位存在2处过热烧损部位，对应的下层线棒槽部直线部位同样存在2处过热烧损部位，如图2所示，烧损部位云母绝缘存在炭化现象，下层线棒表面绝缘损伤较上层线棒严重，其中一处距下端出槽口约110 cm，损伤部位长62 cm；另一处距下端出槽口约46 cm，损伤部位长25 cm，且均为线棒层间部位。定子层间绝缘炭化烧损部位见图2。

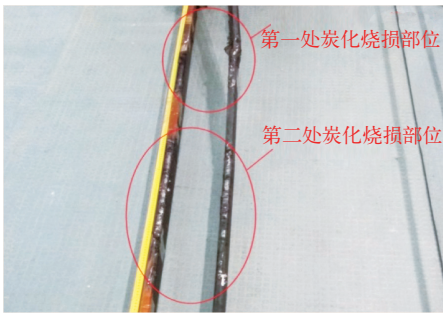

图2　#198上、下层线棒绝缘炭化烧损部位

3．测温垫条及测温电阻

该机组定子线棒层间共布置144根测温垫条，圆周分布，每相48件，每支路6件。主备用测温电阻安装在绝缘垫条中，背靠背布置，在定子铁心槽内轴向分布在上、中、下三个位置，定子层间测温电阻轴向分布如图3所示。测温电阻引线与槽内线棒平行布置，每个测温电阻有3根芯线，外包网状镁铝合金屏蔽层，屏蔽层外为耐高温的聚四氟乙烯绝缘护套，该绝缘护套长期运行温度200℃，极限运行温度250℃。

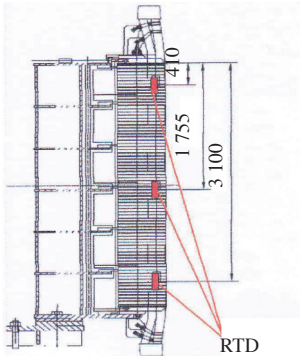

图3　定子测温电阻轴向布置图

检查发现198#槽线棒2处损伤部位间绝缘垫条及内部测温电阻引线均烧断，如图4所示，该层间垫条内的主备用测温电阻外观完好，除本次拔出的198#槽内垫条外，还有17只线棒层间垫条内的主备用测温电阻引线疑似存在损坏现象，三根芯线间最小绝缘电阻值大都在500 Ω以下，如图5所示。

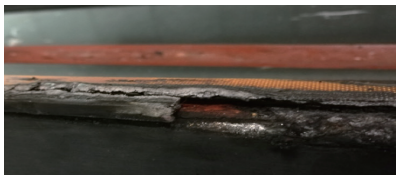

图4　层间绝缘垫条烧损情况

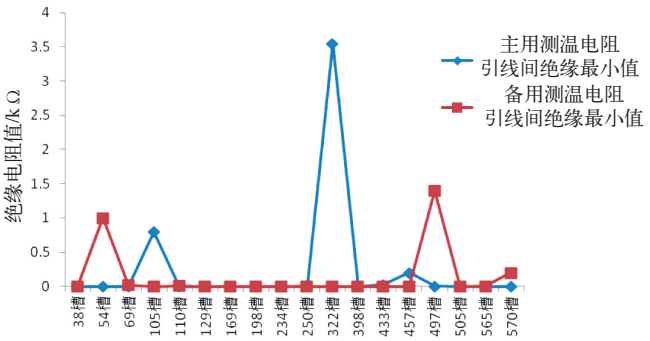

图5　疑似损坏的层间测温电阻引线绝缘测量结果

故障原因诊断

（1）测温垫条制造工艺不良

因测温电阻绝缘护套线径为3.2 mm，层间垫条开槽深度仅为3.5 mm，造成嵌装困难，如图6所示，设备供应商采用剥除绝缘护套，嵌装灌胶的方式制成绝缘垫条，因工艺安装时未分隔金属屏蔽层，造成两套测温电阻金属屏蔽线碰触，引起一点甚至多点短路，如图7所示，烧损绝缘垫条内测温电阻引线最小短路电阻为28 Ω。

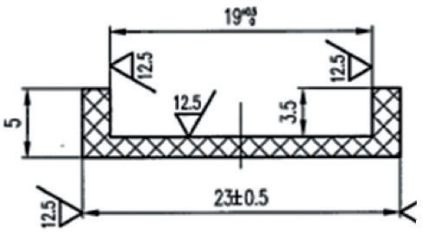

图6　层间测温垫条开槽示意图

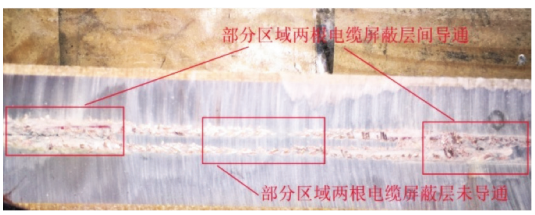

图7　垫条内测温电阻引出线屏蔽层间导通情况

（2）测温垫条内部环流发热损伤线棒

该机组定子线棒烧损痕迹呈现出由测温垫条向定子线棒绝缘表面发展的状态，因此可诊断此次故障的直接原因为测温垫条中主备用测温电阻屏蔽层在封装时，每隔约10 cm存在金属性接触，在定子铁心槽内交变磁场在屏蔽线间交链，产生感应电动势，通过金属接触点形成环流，如图8所示，产生的热量逐渐累积直至烧损测温电阻屏蔽层、引线和测温垫条本体，最终破坏线棒绝缘，引发线棒破压，导致定子接地故障发生。

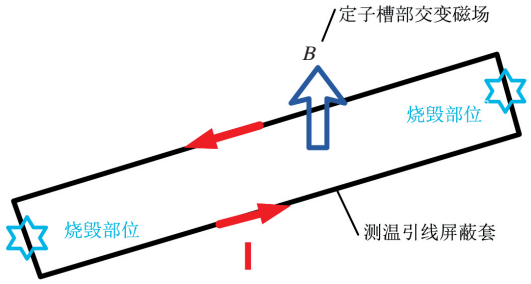

图8　测温电阻引线屏蔽层两点短路后环流示意图

1）屏蔽线中环流产生的热量集中在测温垫条屏蔽接触点部位，由于测温垫条传热性能差，发热点热量累积，造成测温垫条从内到外烧损炭化，同时线棒绝缘层受热加速老化和炭化，绝缘强度降低。

2）因屏蔽线存在多点连通，在定子槽内形成内环流、外环流或多种组合环流，环流产生的热量可能集中在某一点上，当该点烧断就不再形成环流，又集中在下一个接触点上发热，直至再次烧断开路，如图9所示。

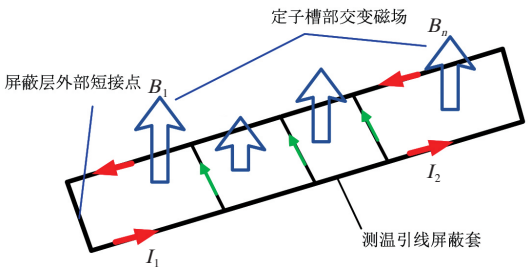

图9　测温电阻引线屏蔽层多点短路后环流示意图

（3）测温电阻引线屏蔽层对线棒表面绝缘外低阻层放电损伤线棒

因测温电阻引线屏蔽层处于垫条上表面，该金属屏蔽层在交变磁场中感应电动势，垫条表层绝缘过热受损后，形成屏蔽层对线棒表面绝缘外低阻层的放电通道，造成屏蔽金属网及线棒绝缘逐渐累积损伤。

（4）测温电阻引线屏蔽层通过线棒表面绝缘低阻层接地形成环流损伤线棒

埋于层间垫条内的测温电阻引线屏蔽层与线棒同处交变磁场中感应电动势，垫条表层绝缘过热受损后，垫条内测温电阻屏蔽层通过线棒表面绝缘低阻层接地形成环流，在图5的测试中也存在不同阻值的接地现象，该电流在接触点产生热量损耗，热量大小与线棒表面绝缘低阻层接地电阻有关，该热量将导致测温垫条表层绝缘和线棒绝缘层受热，加速老化及炭化，绝缘强度降低。

处理及防范措施

1）针对主备测温电阻屏蔽层间存在短路现象的垫条，临时将主、备电阻屏蔽层分别与外部电缆屏蔽层断开悬空，并做好绝缘处理，如图10所示。

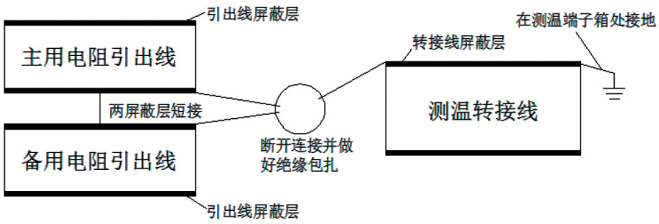

图10　主备用测温电阻屏蔽层短路时处理示意图

2）针对主用或备用电阻屏蔽层存在接地现象的垫条，临时将对地绝缘为零的屏蔽层与外部电缆屏蔽层断开悬空，并做好绝缘处理。

3）研究测温电阻引线走向设计，以防止运行中产生感应电势或尽量减少产生感应电动势的引线长度，当存在感应电势时，应避免测温电阻芯线对地或之间发生短路，更应避免屏蔽线间发生短路。运行中应定期测量主备用测温电阻屏蔽线间绝缘电阻。

4）更换该结构的测温垫条，对测温电阻引出线采用具有绝缘保护套的扁线结构。研究测温垫条开双槽的可行性，保证主备用测温电阻引出线分开布置。更换损伤的上、下层线棒并检查铁心有无受损。

结束语

通过该机组单相接地故障分析诊断，提出了处理及防范措施，以杜绝该类事故的再次发生，同时为大型水轮发电机组的运行维护提供参考。EA

（收稿日期：2018.04.21）
（编辑：朱金凤）